

Auf dem Weg zur optimalen Bildqualität

# Moderne Digitalobjektive für verstellbare Fachkameras

Was ist anders in der digitalen Fotografie?  
Welche neue Anforderungen müssen die Objektive erfüllen?  
Begrenzt der Sensor oder das Objektiv die Bildschärfe?  
Wie zukunftssicher sind unsere aktuellen Digitalobjektive?



## Architektur

Foto: Ferit Kuyas

Höchste Detailschärfe, brillanter Kontrast, geringstmögliche Verzeichnung, Farbsaumfreiheit an kontrastreichen Kanten und ein großer Bildkreis zur Perspektivkorrektur (Behebung oder Abschwächung „stürzender Linien“) sind in der Architekturfotografie unverzichtbare Eigenschaften. Solche Anforderungen können nur verstellbare Fachkameras in Verbindung mit hochauflösenden Digitalrückteilen und mit professionellen Digitalobjektiven erfüllen.



## Industrie

Foto: Raymond Meier

Genau dieselben Eigenschaften sind auch in der Industriefotografie nötig, und deshalb dominieren auch hier verstellbare Fachkameras mit Digitalrückteilen und Digitalobjektiven.



## Landschaft

Foto: Julian Calverley

In der Landschaftsfotografie, z. B. für großformatige Bildbände, wird höchste Detailschärfe verlangt, was hochauflösende Digitalrückteile und Objektive erfordert. Dagegen sind Korrekturen der Perspektive selten oder nur in geringem Maße erforderlich. Dennoch ist ein großer Bildkreis wichtig: Aufnahmen extremer räumlicher Tiefe verlangen maximale Schärfentiefe, die durch eine Objektivschwenkung nach Scheimpflug ohne übermäßiges Abblenden und somit ohne schärfemindernde Beugung möglich wird. Diese Objektivschwenkung benötigt ebenfalls einen deutlich erweiterten Bildkreis.



## Kunst

Foto: Raymond Meier

In der Kunst muss alles erlaubt sein, auch Unschärfe. Doch kommt es z. B. auf präzise Darstellung von Oberflächenstrukturen an, so ist höchstes Auflösungsvermögen nötig. Dann liefern verstellbare Fachkameras mit Objektiven mit großem Bildkreis neue Freiheitsgrade für die Bildgestaltung.

## Verstellbare Fachkamaras korrigieren die Perspektive und erweitern die Schärfentiefe ohne zusätzliche Abblendung



**Vertikalshift mit Weitwinkel- und Standardobjektiven**

In der Porträt-, Mode-, Sport- oder Reportagefotografie werden SLR-Kameras bevorzugt, in anderen Bereichen der professionellen Fotografie jedoch sind verstellbare Fachkamaras nötig. Sie erlauben die perfekte Kontrolle über die Perspektive und Schärfentiefe. Ihre Digitalrückteile mit großen Sensorformaten und komplexerer Elektronik und Software sind in Auflösung, Farbtreue und Rauschfreiheit den Sensoren von Kleinbild-SLR-Kameras weit überlegen.

Allerdings sind Höchstleistungen nur dann zu erreichen, wenn auch die verwendeten **Objektive** beste Schärfe bis zu den Bildecken, hohen Kontrast sowie Freiheit von Farbsäumen und von Verzeichnung bieten.

Die zum Teil auch ohne Stativ einsetzbaren Architektur-Kameras ermöglichen die Entzerrung stürzender Linien.



### Sachfotografie, Stilleben, Food

(Anzeigen- und sonstige Produktwerbung, Kataloge, Prospekte, Sachbücher)

### Architektur-, Industrie- u. Luftbildfotografie

### Landschaftsfotografie

(Bildbände, Postkarten, Poster, Touristikwerbung)

### Künstlerische Fotografie



**Vertikal- und Horizontalshift, Scheimpflug-Schwenkung und große Brennweiten-/Auszugsflexibilität**

Fachkamaras auf optischer Bank sind das Werkzeug professioneller Fotografen.



Ein größerer Sensor mit höherer Auflösung allein genügt anspruchsvollen Profi-Fotografen nicht, Kameras und Objektive müssen auch Parallelverschiebung und Scheimpflug-Schwenkung erlauben

Auch mit der alten Fachkamera und ihren Objektiven kann man digital fotografieren. Aber so wird man die Bildqualität aktueller Digitaltechnik nicht annähernd erzielen, da Sensor und Film sehr verschieden sind.

## 1. Die Sensoren haben kleinere Formate

Die Sensorformate sind kleiner als die professionellen Filmformate. Die Kameras sowie ihre Verstellwege und Schwenkwinkel dürfen kleiner sein, während ihre Präzision höher sein muss. Die Objektive haben kürzere Brennweiten und kleinere Bildkreise, aber müssen eine höhere Auflösung bieten.

## 2. Die Sensorfläche ist fast perfekt eben

Anders als beim Film ist die lichtempfindliche Oberfläche beim Sensor perfekt plan. Eine bessere Bildfeldebahnung der Objektive führt zu sichtbar besserer Bildschärfe.

## 3. Schutz- und Filterglas vor dem Sensor

Weil der Sensor auch auf Infrarotstrahlung reagiert, ist ein Infrarot-Sperrfilter nötig, das zugleich mechanischen Schutz bietet. Das ca. 2 mm dicke Glas verursacht jedoch Abbildungsfehler (Unschärfe und Farbsäume). Neue Digitalobjektive können speziell zu deren Kompensation korrigiert werden.

## 4. Das Schutz- und Filterglas spiegelt

Das stärker als die Filmschicht spiegelnde Glas erzeugt mehr Streulicht und eventuell

sogar Geisterbilder. Deshalb muss die Vergütung der Objektive verbessert werden.

## 5. Mikrolinsen verstärken Vignettierung

Zur Empfindlichkeitssteigerung werden oft Mikrolinsen vor den Pixeln verwendet, die am Bildrand einen Helligkeitsabfall verursachen. Digitalobjektive mit vergrößerter Schnittweite verhindern diesen Fehler.

## 6. Regulärer Pixelraster erzeugt Moiré

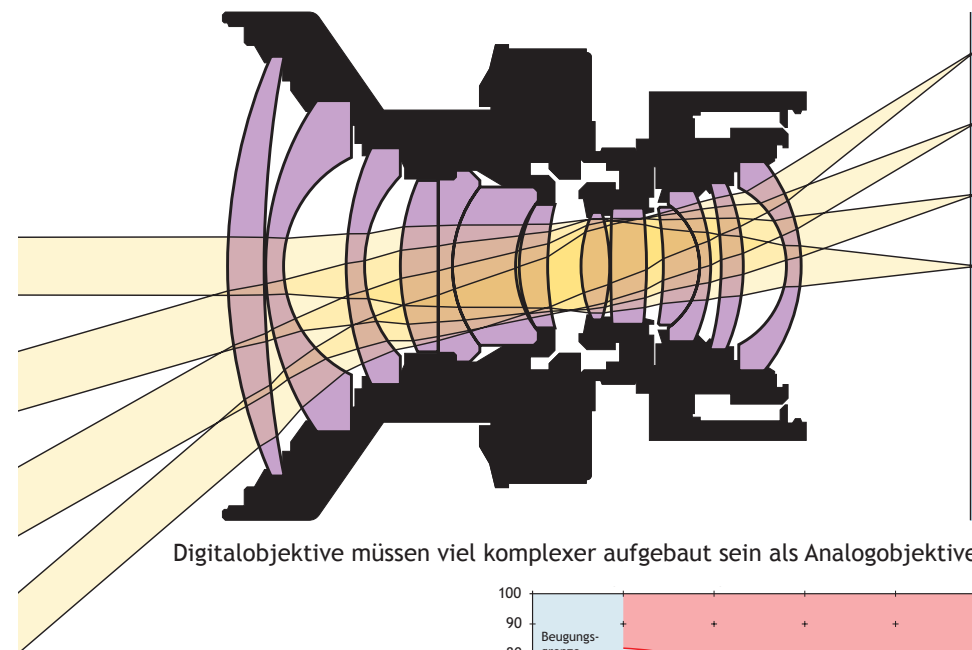
Während die Größe und Abstände des Filmkorns variieren, sind beim Sensor alle Pixel gleich groß und in einem rechtwinkligen Raster angeordnet. Das führt bei sehr feinen regelmäßigen Bildstrukturen zu Moiré.

## 7. Bayer-Farbfiler erzeugt Farbrauschen

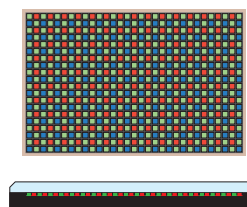
Die schachbrettähnliche Farbenanordnung im Bayer-Filter ist ebenfalls Ursache für Moiré und erfordert Interpolation. Beides führt zu einem deutlichen Farbrauschen.

## 8. Sensor- kontra Objektiv-Auflösung?

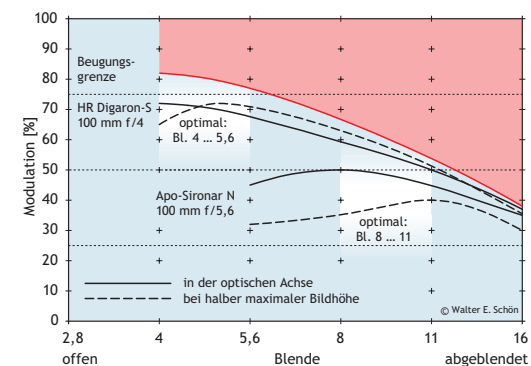
Die Bildschärfe wird von der Auflösung des Objektivs und des Sensors begrenzt. Doch das Optimum wird nicht erreicht, wenn die Pixelrasterweite gleich dem Beugungsscheibchendurchmesser ist. Vielmehr gilt, dass die Schärfe mit kleiner werdender Pixelrasterweite zunimmt, bis diese etwa 1/4 des Beugungsscheibchendurchmessers beträgt: Die Schwachstelle ist der Sensor!



Digitalobjektive müssen viel komplexer aufgebaut sein als Analogobjektive.



Die anderen Eigenschaften des Sensors stellen höhere Ansprüche an das Objektiv.



Keinere Formate und höhere Auflösung erfordern Höchstleistung bei großer Öffnung.

**Der Sensor eines Digitalrückteils unterscheidet sich so stark vom herkömmlichen Film, dass für optimale Bildergebnisse andere Kameras und spezielle Digitalobjektive nötig werden**

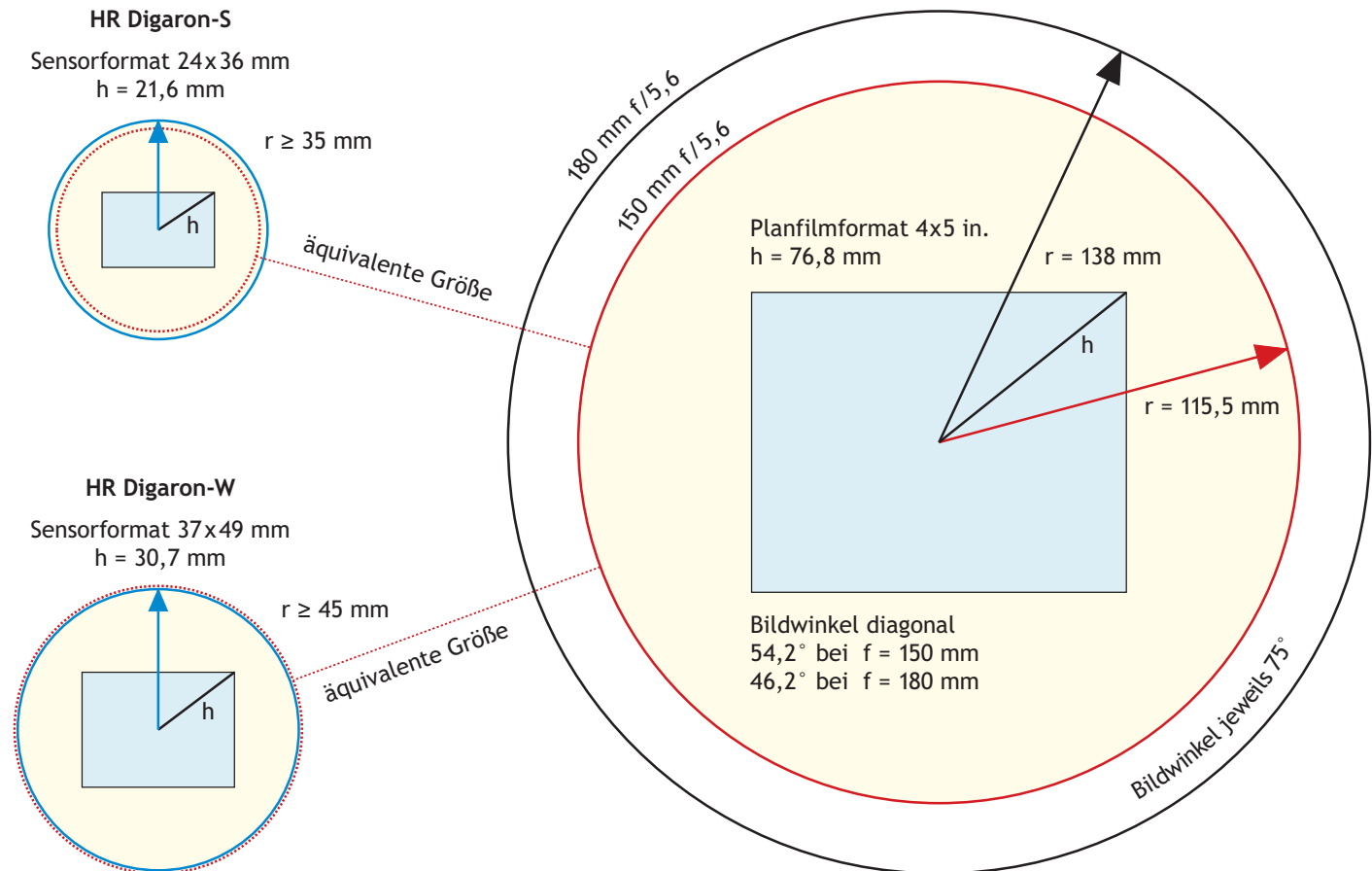
# Die Sensorformate sind kleiner als die klassischen Planfilmformate, aber für Kameraverstellungen ist auch hier ein übergroßer Bildkreis nötig

## Sensorformate und Bildkreisgrößen

Die Sensorformate professioneller Digitalrückteile sind sehr viel kleiner als das früher übliche Planfilmformat 4x5 in. Aktuelle Standardformate sind 24x36 mm und 37x49 mm. Seltener sind Zwischenformate um 33x44 mm und für höchste Ansprüche an das Auflösungsvermögen die größten Sensorformate 36x56 mm und 40x54 mm. Somit liegt die Sensorfläche zwischen 8% (Format 24x36 mm) und 19% (40x54 mm) der Fläche des Planfilmformats 4x5 in. Trotzdem wird eine vergleichbare, wenn nicht bessere Bildschärfe erwartet. Das stellt unglaubliche hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen der Objektive.

Die Objektivserien HR Digaron-S für kleinere und HR Digaron-W für größere Sensorformate haben nicht mehr 6 bis 8 Linsen wie herkömmliche Großformatobjektive, sondern bis zu 15 Linsen! Damit erreichen sie nicht nur eine extrem hohe Auflösung (weshalb die MFT-Kurven jetzt für bis zu 80 Linienpaare pro Millimeter\* angegeben werden), sondern bieten auch große Bildkreise über die Formatgröße hinaus, dass vergleichbare Kameraverstellungen wie früher bei Aufnahmen mit den Planfilmformaten für die Parallelverschiebung und Scheimpflug-Schwenkung möglich sind.

\* Im analogen Kleinbildformat war eine Angabe bis maximal nur 40 Lp/mm üblich.



Die Rodenstock-Digitalobjektive HR Digaron-S und HR Digaron-W bieten relativ zur Sensorgröße übergroße Bildkreise und dennoch nicht nur im Zentrum, sondern bis zum Rand hohen Kontrast und überragendes Auflösungsvermögen

# Kleinere Formate erlauben weniger Abblendung für gleiche Schärfentiefe und verlangen weniger Abblendung zur Vermeidung störender Beugung

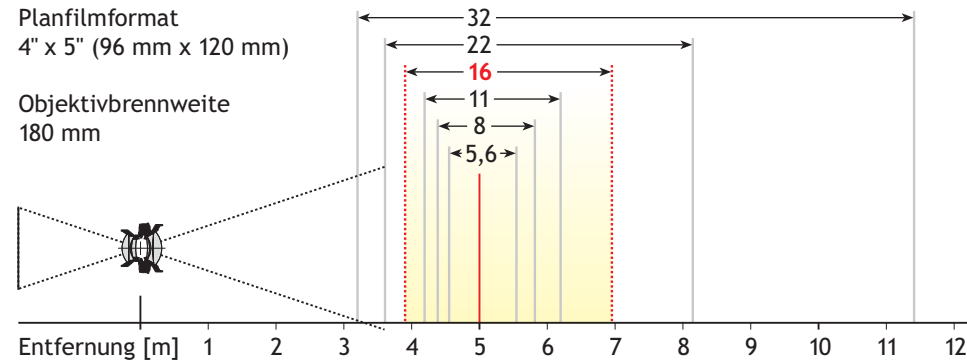
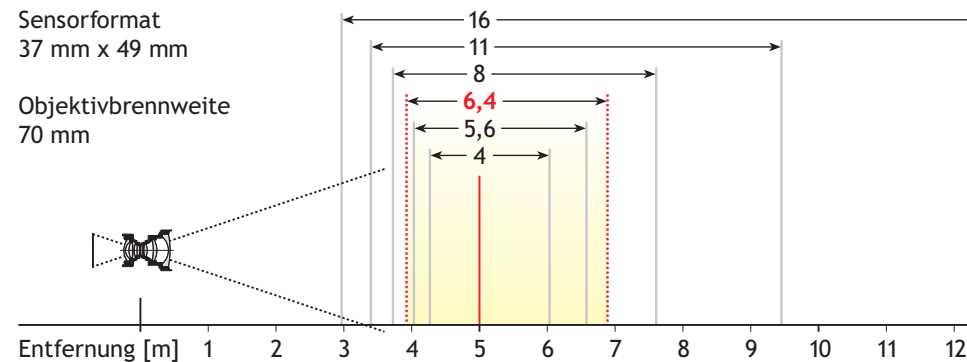
## Brennweite proportional zum Format

Um mit einem kleineren Aufnahmeformat vom gleichen Standort den gleichen Motivausschnitt wie mit einem größeren Format aufzunehmen, ist eine kürzere Brennweite erforderlich. Äquivalente Brennweiten für die verschiedenen Formate müssen zu den Formatdiagonalen proportional sein.

Die kürzeren Brennweiten bei kleineren Sensorformaten liefern größere Schärfentiefe. Also darf man die Blende für gleiche Schärfentiefe weiter öffnen. Mathematisch lässt sich beweisen, dass die für gleiche Schärfentiefe in beiden Aufnahmeformaten erforderlichen Blendenzahlen wie die jeweiligen Brennweiten zu den Formatdiagonalen proportional sind (siehe Tabelle).

Wegen der bei kleinerem Format geringeren zulässigen Unschärfe wirkt sich die beim Abblenden zunehmende Beugung viel früher aus. Deshalb muss man die Blende weiter öffnen. Die mathematische Berechnung zeigt, dass auch hier die für gleiche Beugung im Endergebnis erforderlichen Blendenzahlen zu den Formatdiagonalen proportional sind (siehe Tabelle).

Die Digitalobjektive müssen also schon bei großen Blendenöffnungen höchste Abbildungsleistung bringen, damit die bei den kleineren Sensorformaten nötigen größeren Öffnungen tatsächlich einsetzbar sind.



Äquivalente Brennweiten sichern gleichen Bildwinkel bzw. gleichen Motivausschnitt.  
Äquivalente Blendenzahlen sichern gleiche Schärfentiefe und gleiche Beugung.

Identische Beugungsunschärfe und auch gleiche Schärfentiefe ergeben sich für

Planfilm	bei Blende					
4x5 in.	8	11	16	22	32	45
Sensoren	bei Blende					
24x36 mm	2,3	3,2	4,5	6,4	9	13
33x44 mm	2,8	4	5,6	8	11	16
37x49 mm	3,2	4,5	6,4	9	13	18
40x54 mm	3,5	4,8	7	9,7	14	20

### Wichtige Regel:

Nie stärker abblenden, als es für die benötigte Schärfentiefe sein muss.

Scheimpflug bringt oft 2 bis 3 Blendenstufen.

kritischer Bereich

Bei kleinen Sensorformaten wird bereits ab Blende 8 - 11 störende Beugungsunschärfe sichtbar, aber die größere Schärfentiefe erlaubt es auch, weniger abzublenzen als früher bei Planfilmaufnahmen

# Wegen der kleinen Digitalformate muss schon bei geringer Abblendung eine extrem hohe Abbildungsleistung gewährleistet sein

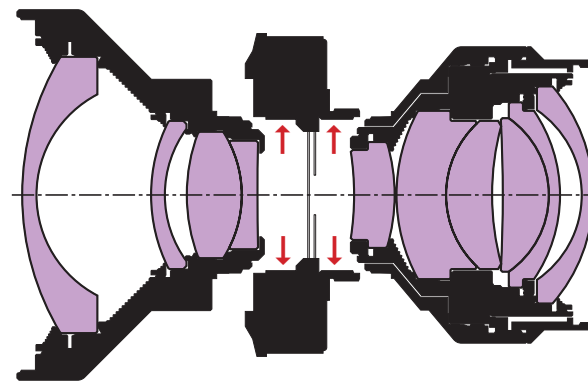
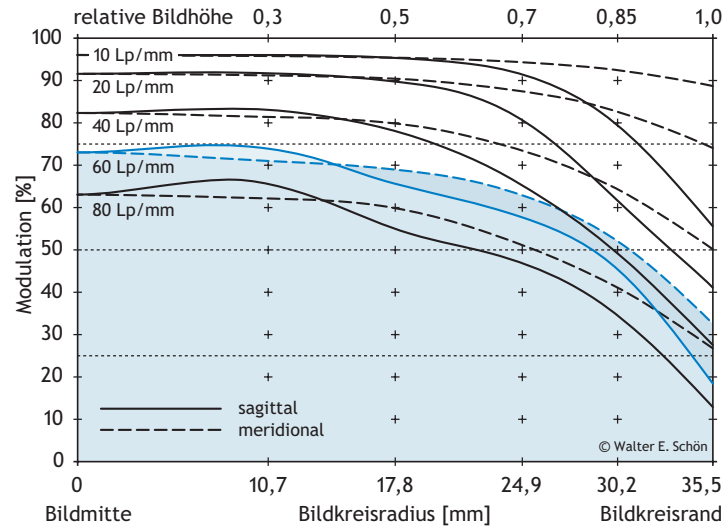
## Schärfer trotz kleinerer Bildfläche

Um das extrem hohe Auflösungsvermögen der Sensoren aktueller Digitalrückteile für mindestens gleiche, wenn nicht bessere Schärfe als bei Planfilmaufnahmen zu nutzen, müssen die Digitalobjektive höchste Leistung zeigen. Das wird durch die Forderung erschwert, schon bei großen Blendenöffnungen beste Schärfe zu erzielen.

Die Digitalobjektivserien HR Digaron-S und HR Digaron-W wurden darum kompromisslos auf höchste Bildqualität schon bei großen Blendenöffnungen getrimmt. Der außergewöhnlich hohe konstruktive Aufwand in Optik und Mechanik, eng limitierte Fertigungstoleranzen sowie eine Justiermöglichkeit des Hinterglieds nach dem Einbau in den Verschluss (doppelte Fassung – siehe rechts außen) haben zu exzellenten Ergebnissen geführt, wie hier ihre MTF-Kurven zeigen (MTF = Modulation Transfer Function = Kontrastübertragungsfunktion):

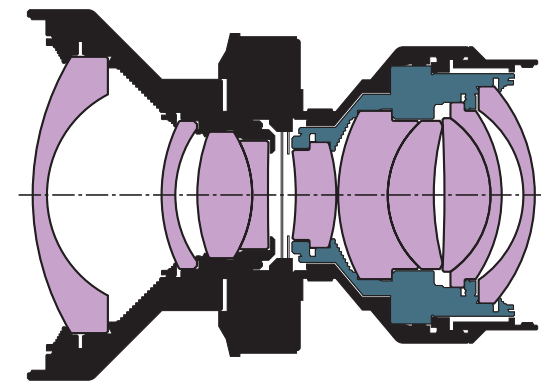
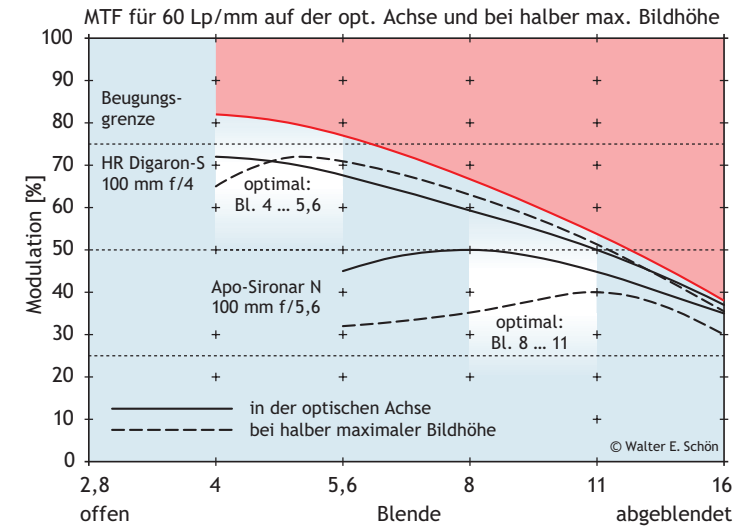
Während die besten herkömmlichen Großformatobjektive ihre optimale Leistung im zentralen Bereich zwischen Blende 8 und 11 und nahe dem Bildkreisrand ab Blende 16 liefern, erreichen die besten Digitalobjektive ihr Optimum im zentralen Bereich zwischen Blende 4 und 5,6 sowie am Bildkreisrad bei Blende 8. Damit erfüllen sie die obige Forderung perfekt. Über Blende 8 wird das Auflösungsvermögen nur noch von unvermeidbarer Beugung begrenzt.

MTF-Kurven des HR Digaron-S 60 mm f/4 bei Blende 5,6



Die Verschlussgewinde bringen schädliche Toleranzen ins Spiel, ...

MTF-Vergleich herkömmlicher und neuer Objektive



... die durch Justage der Innenfassung behoben werden können

**Die Rodenstock-Digitalobjektive HR Digaron-S und HR Digaron-W sind nicht nur abgeblendet schärfer, sondern bereits bei offener Blende, damit die physikalisch unvermeidbare Beugung minimal bleibt**

## Das Schutz- und Filterglas von ca. 2 mm Dicke vor dem Sensor verursacht sichtbare Aberrationen, die zu korrigieren sind

### Korrektion der Schutzglasaberration

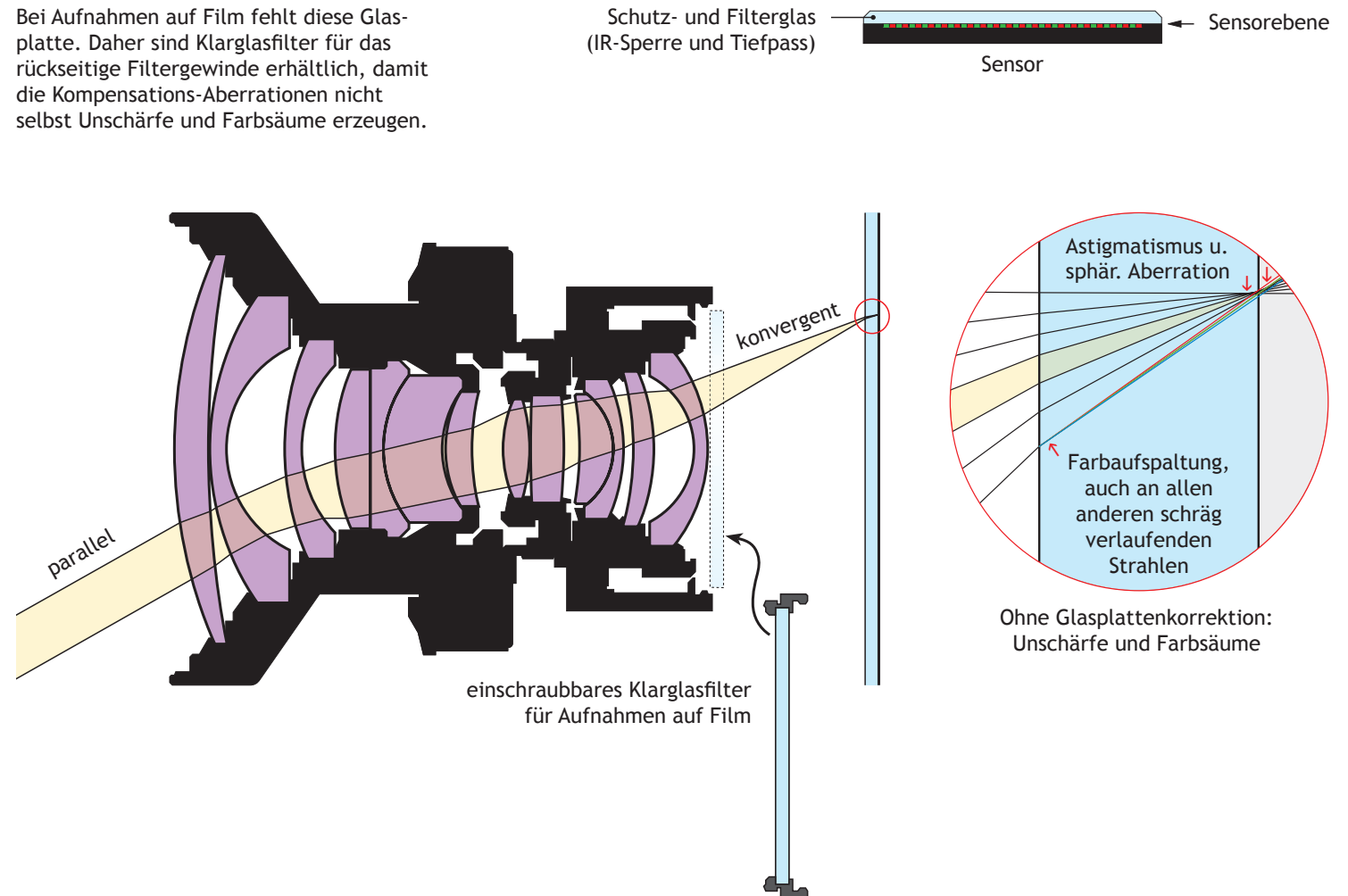
Im Gegensatz zum Film hat der Sensor vor seiner lichtempfindlichen Oberfläche eine ca. 2 mm dicke Glasplatte. Sie dient einerseits als mechanischer Schutz und andererseits als Infrarot-Sperrfilter (Sensoren von Digitalrückteilen haben eine hohe IR-Empfindlichkeit, die unterdrückt werden muss). Die Platte kann auch ein Tiefpassfilter zur Unterdrückung von Artefakten enthalten.

Eine planparallele, perfekt glatte und homogene Filter-Glasplatte dieser Dicke vor dem Objektiv hat keine negative Wirkung, weil die von jedem Punkt eintreffenden Lichtstrahlen (nahezu) parallel verlaufen.

Aber das Schutz- und Filterglas des Sensors liegt hinter dem Objektiv im konvergen-ten, d.h. kegelförmig im Bildpunkt zusammenlaufenden Strahlengang. Das erzeugt Abbildungsfehler, nämlich Astigmatismus, sphärische und chromatische Aberration, also Unschärfe und schwache Farbsäume.

Beim HR Digaron-S und HR Digaron-W ist die Optikrechnung so ausgelegt, dass die vom Schutz- und IR-Filterglas des Sensors verursachten Aberrationen durch entgegengesetzt gerichtete des Objektivs kompensiert werden. Das steigert die Schärfe und gewährleistet farbsaumfreie Bilder.

Bei Aufnahmen auf Film fehlt diese Glasplatte. Daher sind Klarglasfilter für das rückseitige Filtergewinde erhältlich, damit die Kompensations-Aberrationen nicht selbst Unschärfe und Farbsäume erzeugen.



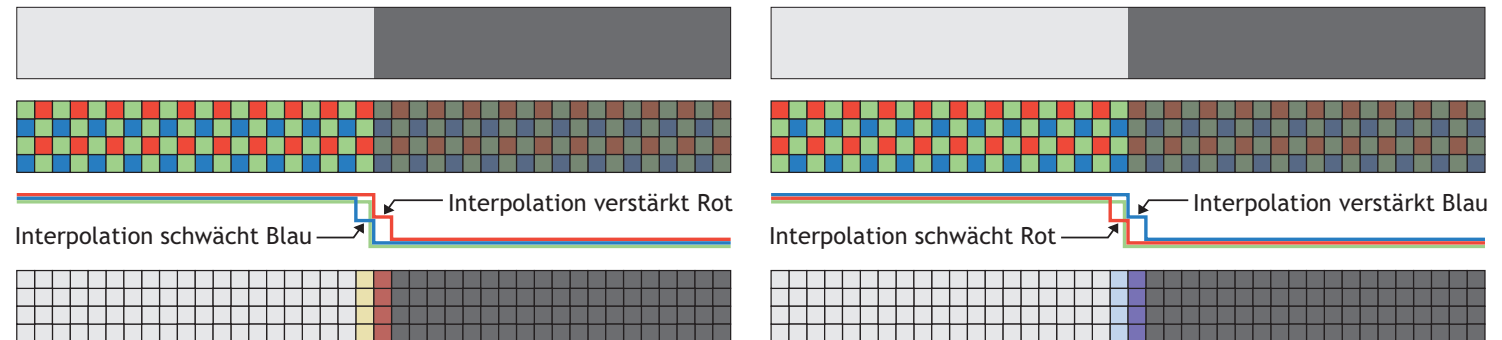
Das dicke Schutzglas verursacht Astigmatismus sowie sphärische und chromatische Aberration, die für hochauflösende Sensoren in der Optikrechnung korrigiert werden müssen



# An Hell-dunkel-Kanten entstehen beim Bayer-Filter Farbsäume und verursachen mit Moiré-Effekten ein Interpolations-Farbrauschen

## Farbinterpolation erzeugt Farbsäume

An der Grenze zwischen hellen und dunklen Flächen verursacht die Interpolation in den direkt benachbarten Pixelreihen oder -zeilen einen Farbsaum. Je nachdem, ob auf der hellen Seite der Kante rote (linkes Bild) oder blaue Pixel (rechtes Bild) liegen, ist der Farbsaum orange oder blauviolett. Die doppelt so zahlreichen Grünpixel kommen in jeder Reihe und Zeile vor und verursachen keine Interpolations-Farbsäume.

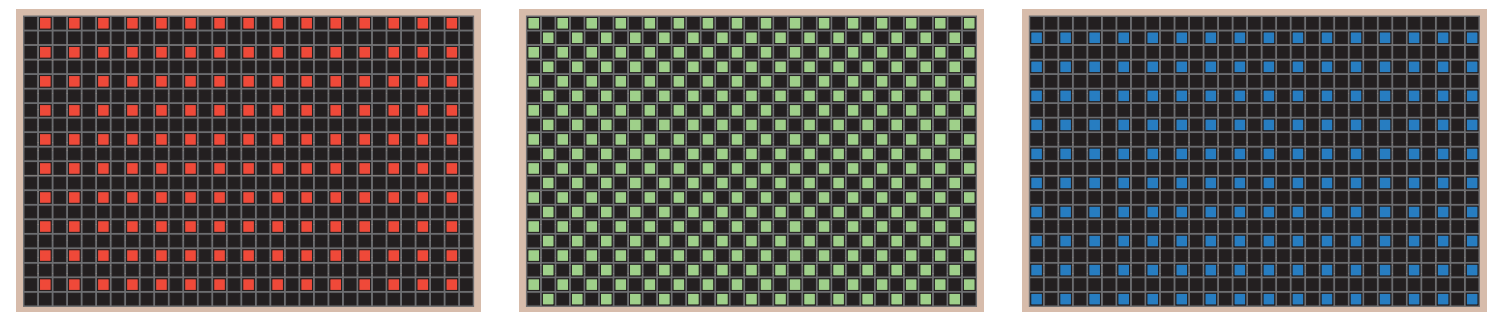


Weil derselbe Effekt nicht nur an kontrastreichen Kanten zwischen Flächen, sondern auch von linien- und punktförmigen Strukturen auftritt, diese Farbsäume aber meist feingliedrig und unregelmäßig verteilt sind, wirken sie ähnlich wie Farbrauschen.

Während das thermische Farbrauschen vor allem in homogenen Flächen störend sichtbar wird, zeigt sich Interpolations-Farbrauschen nur in feinstrukturierten Flächen.

Auch das innerhalb jeder RGB-Farbe wegen der regelmäßigen Pixelstruktur auftretende rote, grüne und blaue verstärkt in feinstrukturierten Flächen das Farbrauschen, wenn die Bildstrukturen regelmäßig sind. Denn die Moiré-Muster sind in jeder RGB-Farbe etwas anders, weshalb sie sich bei der Überlagerung nicht farblich neutralisieren, sondern eine bunt gesprenkelte Struktur auf dem Moiré-Muster liefern.

In jedem der drei Farbauszüge entsteht wegen der regelmäßigen Pixelstruktur Moiré, aber jedesmal sieht dieses Moiré etwas anders aus.



Im roten Farbauszug entsteht Moiré bevorzugt bei vertikalen und horizontalen Linienstrukturen, weil die Rotpixel in senkrechten und waagerechten Reihen mit doppeltem Pixelabstand angeordnet sind. Deshalb entspricht die Nyquistfrequenz der Rasterweite von vier Pixeln (aller Farben).

Im grünen Farbauszug entsteht Moiré bevorzugt bei 45° schrägen Linienstrukturen, weil die Grünpixel in schrägen Reihen mit ca. 1,4facher Pixelfrequenz angeordnet sind. Die Nyquistfrequenz entspricht etwa der 2,8fachen Pixelrasterweite. Der Moiréeffekt an den vertikalen und horizontalen Pixelreihen ist hier schwächer ausgeprägt.

Im blauen Farbauszug ist die Pixelanordnung wie im roten Farbauszug und daher entsteht Moiré bei gleich feinen Bildmustern. Aber weil die blauen Pixel um je eine Pixelrasterweite in der Höhe und seitlich gegenüber den roten Pixeln versetzt sind, fällt das Moiré-Muster anders aus.

Da Rot- und Blau-Pixel nur in jeder zweiten Spalte bzw. Zeile vorkommen, entstehen an Kanten Farbsäume, und die im Rot- und Blauauszug andere Nyquistfrequenz als im Grünauszug verbindet Moiré mit Farbrauschen

# Dass die Beugungsunschärfe kleiner als die Pixelrasterweite sein müsse, ist ein weitverbreiteter Irrtum – hier wird er überzeugend widerlegt

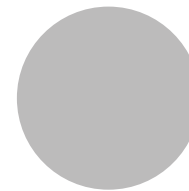
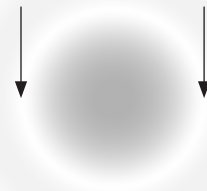
## Beugungsscheibchen- und Pixelgröße

Sogar erfahrene Fotografen nehmen oft an, dass Beugungsscheibchen und Pixelquadrate bei gleicher Größe gleiche Wirkung auf die Schärfe haben. Doch das ist falsch, weil ...

1. das Beugungsscheibchen an jedem Ort liegen kann (also keine treppenförmigen Kanten bildet), ein Pixelquadrat aber nur an den vom Raster vorgegebenen Stellen,
2. das Beugungsscheibchen in der Mitte am hellsten ist und zum Rand hin allmählich dunkler wird (der Durchmesser also kleiner wahrgenommen wird) und die umgebenden Ringe meistens so gut wie unsichtbar sind.

Die folgenden Bilder zeigen, dass die quadratischen Pixel einen wesentlich höheren negativen Einfluss auf die Bildschärfe haben als gleich große Beugungsscheibchen:

- Die Pixelquadrate bilden gegeneinander scharf abgegrenzte und in sich homogene Kacheln und an schrägen Kanten Stufen. Es gibt keine glatten Verläufe an Kanten oder in Flächen wechselnder Helligkeit.
- Die Pixelquadrate bilden ein periodisches Muster, das zu Moiré und Artefakten führt.
- Die Pixelquadrate können keine „Punkte“ zwischen den Pixelzeilen und -spalten des Rasters darstellen; ein Punkt dazwischen färbt zwei bis vier Pixel ein, deren Helligkeitsverhältnis von der Punktlage abhängt. Bildpunkte werden bis zu vier Pixel groß.



Als **Beugungsscheibchen**-Durchmesser gilt der Durchmesser des Nullstellenrings zwischen dem zentralen Scheibchen und dem ersten Ring (Rayleigh-Kriterium). Das zentrale Scheibchen wirkt kleiner, weil seine Intensität zum Rand hin abfällt. Das Zentrum des Beugungsscheibchens liegt genau dort, wo die Punktabbildung sein sollte.

Das **Unschärfescheibchen** als Folge ungenauer Entfernungseinstellung ist dagegen scharf begrenzt, von homogener Intensität und wirkt bei gleichem Durchmesser merklich größer als ein Beugungsscheibchen. Sein Zentrum liegt ebenfalls dort, wo die scharfe Punktabbildung sein sollte, ist also auch an keine Rasterstruktur gebunden.

Ein **quadratisches Pixel** mit der Kantenlänge des Beugungsscheibchen-Durchmessers ist ebenfalls scharf begrenzt, von homogener Intensität und wirkt noch größer als ein Unschärfescheibchen. Es ist an die feste Pixelrasterstruktur gebunden, kann also nicht irgendwo dazwischen liegen und reduziert dadurch die Schärfe drastisch.



Scharfe Originalstruktur ohne Pixel und Beugung



Resultierende Bildstruktur aus Beugungsscheibchen 6 µm ohne Pixelraster



Resultierende Bildstruktur aus Pixelrasterweite 6 µm ohne Beugung



Resultierende Bildstruktur aus Pixelrasterweite 6 µm und Beugungsscheibchen 6 µm

↑ kaum ein Unterschied ↑

**Wenn Beugungsscheibchen-Durchmesser und Pixelrasterweite gleich groß sind, wird die Bildschärfe weitgehend von der Pixelrasterstruktur bestimmt; ihr Einfluß dominiert um mehr als den Faktor 4**

## Auch bei „normalen“ Motiven statt Siemensstern-Testtafeln hat Beugung weit weniger Einfluss auf die Bildschärfe als die Pixelrasterweite

### Pixelgrößensimulation durch Binning

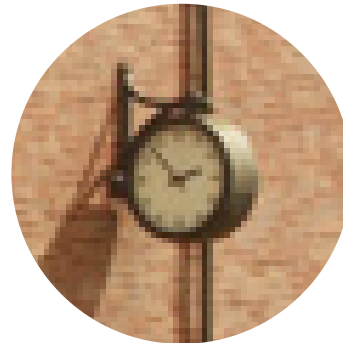
Wenn unsere Überlegungen zur Beugungs- und Pixelgröße stimmen, heißt das, dass unsere höchstauflösenden Digitalrückteile die Schärfeleistung der besten Objektive noch nicht darstellen können. Also könnten diese Objektive mit höherer Sensorauflösung noch schärfere Aufnahmen liefern!

Wir wollen das anhand der Ihnen schon bekannten Uhr prüfen. Die Ausschnittvergrößerung rechts außen stammt aus der Aufnahme mit dem HR Digaron-W 32 mm f/4 bei Blende 16. Bei dieser kleinen Blende ist das Beugungsscheibchen nach dem Rayleigh-Kriterium 21,7 µm groß, also fast viermal so groß wie die Pixelrasterweite des verwendeten 60-Megapixel-Sensors.

Man sollte meinen, dass bei so großer Beugungsunschärfe auch ein Sensor von weit geringerer Auflösung für annähernd gleiche Schärfe ausgereicht hätte. Ist das wahr?

Wir können das leicht überprüfen, indem wir durch Binning mit Photoshop die Pixelrasterweite verdoppeln (mittleres Bild) und vervierfachen (linkes Bild):

Ist die Pixelgröße etwa gleich der Beugung (linkes Bild), wird die Schärfe hauptsächlich von der Pixelgröße bestimmt. Sind die Pixel halb so groß, erzielen wir noch immer nicht die beste Schärfe. Erst wenn die Pixelgröße einem Viertel entspricht, haben wir das optimale Verhältnis zur Beugung.



Pixelrasterweite  
≈  
Beugungsscheibchen-Durchmesser  
Beugungsscheibchen-Ø = 21,7 µm  
und  
Pixelrasterweite = 24 µm

Durch Binning ließ sich hier die Pixelrasterweite des Sensors an die Größe der Beugung anpassen, ...



Pixelrasterweite  
≈  
1/2 Beugungsscheibchen-Durchmesser  
Beugungsscheibchen-Ø = 21,7 µm  
und  
Pixelrasterweite = 12 µm

... aber sogar bei nur halber Größe wird die Schärfeleistung des Objektivs noch nicht im Bild sichtbar.



Pixelrasterweite  
≈  
1/4 Beugungsscheibchen-Durchmesser  
Beugungsscheibchen-Ø = 21,7 µm  
und  
Pixelrasterweite = 6 µm

Erst eine Pixelrasterweite von etwa 1/4 des Beugungsscheibchen-Durchmessers (16fache Pixelanzahl!) reicht aus.

Die Pixelrasterweite beeinträchtigt die Schärfe mehr als Beugung mit gleicher Scheibchengröße. Eine optimale Abstimmung beider Größen für bestmögliche Schärfe ergibt sich, wenn die Pixelrasterweite etwa ein Viertel des Beugungsscheibchen-Durchmessers beträgt.

Bei Blende 5,6 ist das Beugungsscheibchen aber nur 7,6 µm groß, was dann für knapp unter 2 µm Pixelrasterweite ausreicht.

**Die beugungsbegrenzte Auflösung der Rodenstock-Digitalobjektive mit 5,4 µm großem Beugungsscheibchen bei Blende 4 (10,7 µm bei Blende 8) reicht sogar noch für künftige Pixelrasterweiten bis zur Größenordnung von ca. 2 µm**

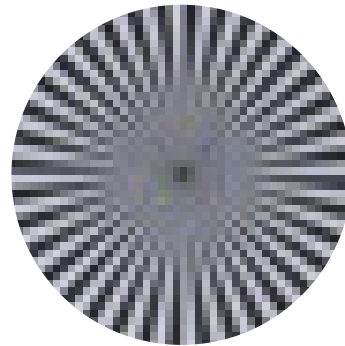
## Aufnahmen eines Siemenssterns zeigen auch noch zunehmende Schärfe, wenn die Pixelrasterweite wesentlich kleiner als die Beugung wird

### Die Pixelgröße begrenzt die Schärfe

Die Vergleiche auf der vorigen Seite haben anschaulich gezeigt, dass die Pixelstruktur einen wesentlich größeren Einfluss auf die resultierende Bildschärfe hat als die Größe des Beugungsscheibchens. Jetzt werden wir versuchen, das Verhältnis dieser beiden Einflüsse quantitativ genauer zu ermitteln.

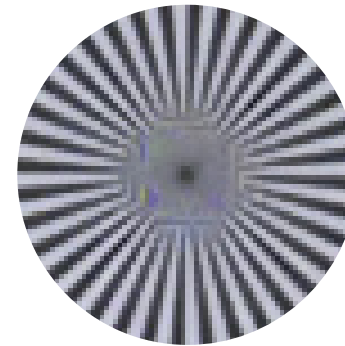
Siemenssterne eignen sich wegen ihrer zur Mitte hin immer feineren Struktur (= höher werdender Ortsfrequenz) besonders gut als Testmotive. Alle drei hier stark vergrößerten Siemensstern-Aufnahmen wurden mit einem hochauflösenden Objektiv gemacht, das auf Blende 5,6 abgeblendet war und daher ein Beugungsscheibchen von 7,6 µm Durchmesser lieferte. Nach herkömmlicher Meinung sollte die erste Aufnahme, bei der die Pixelrasterweite ebenfalls 7,6 µm war, bereits das bestmögliche Ergebnis liefern, weil die Beugungsscheibchen und die Pixelrasterweite exakt gleich groß sind.

Doch die zweite Aufnahme mit unveränderter Beugung und nur halb so großer Pixelrasterweite sieht deutlich schärfer aus, und die dritte Aufnahme mit nochmals halbiertes Pixelrasterweite zeigt unbestreitbar eine weitere Steigerung der Schärfe. Erst wenn man noch ein weiteres Mal die Pixelrasterweite halbiert, nimmt man keine nennenswerte Schärfesteigerung mehr wahr. Das optimale Verhältnis zwischen Objektiv- und Sensorauflösung ist also 1:4.



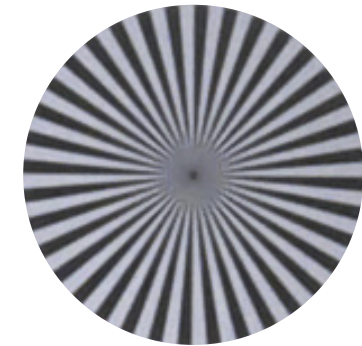
Pixelrasterweite  
=  
Beugungsscheibchen-Durchmesser  
  
Beugungsscheibchen-Ø = 7,6 µm  
und  
Pixelrasterweite = 7,6 µm

Wenn dieses Bild ein Ausschnitt aus einer Digitalaufnahme mit 37 mm x 49 mm großem Sensor von **30 Megapixel** Auflösung wäre, ...



Pixelrasterweite  
=  
1/2 Beugungsscheibchen-Durchmesser  
  
Beugungsscheibchen-Ø = 7,6 µm  
und  
Pixelrasterweite = 3,8 µm

... dann entspräche dieses Bild einer Aufnahme mit demselben Objektiv, gleicher Blende und gleich großem Sensor mit **120 Megapixel** Auflösung ...



Pixelrasterweite  
=  
1/4 Beugungsscheibchen-Durchmesser  
  
Beugungsscheibchen-Ø = 7,6 µm  
und  
Pixelrasterweite = 1,9 µm

... und dieses noch schärfere Bild einer Aufnahme mit demselben Objektiv, gleicher Blende und gleich großem Sensor mit **480 Megapixel** Auflösung.

Wenn man **Blende 8** als Standard zugrundelegt, weil oft mehr Schärfentiefe nötig ist, halbiert sich die maximale Pixelzahl; die heutige Objektivauflösung reicht dann bis **240 Megapixel** aus.

Wenn die Pixelrasterweite gleich dem Beugungsscheibchen-Durchmesser ist, wird die Schärfeleistung des Objektivs längst nicht ausgeschöpft; sie nimmt bei Blende 8 bis zur 8fachen und bei Blende 5,6 bis zur 16fachen Pixelzahl sichtbar zu